



工业和信息化普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

高等院校基础教育“十二五”规划教材

大学物理 (下册)

魏健宁 谢卫军 主编



*College
Physics*



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

高等院校基础教育“十二五”规划教材

大学物理 (下册)

魏健宁 谢卫军 主编

*College
Physics*

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理. 下册 / 魏健宁, 谢卫军主编. — 北京 :
人民邮电出版社, 2014.9
高等院校基础教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-115-35468-6

I. ①大… II. ①魏… ②谢… III. ①物理学—高等
学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第169134号

内 容 提 要

本书是根据教育部的非物理专业物理课程基本要求, 借鉴国内外优秀大学物理教材, 结合多年教学改革与实践经验, 由多名教学经验丰富的一线教师编写而成的。

本书分为上下两册。本书为下册, 分热学、机械振动和机械波、波动光学和近代物理学四篇, 共9章, 内容包括热力学基础、气体动理论、机械振动、机械波、光的干涉、光的衍射、光的偏振、相对论和量子物理。

本书可作为普通高校非物理专业本科生学习大学物理的教材, 也可作为物理学爱好者阅读的参考资料。

-
- ◆ 主 编 魏健宁 谢卫军
 - 责任编辑 马小霞
 - 执行编辑 喻智文
 - 责任印制 张佳莹 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 14.75 2014年9月第1版
 - 字数: 372千字 2014年9月北京第1次印刷
-

定价: 33.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

大学物理（下册）

编 委 会

主 编 魏健宁 谢卫军

副 主 编 胡 华 杨锋涛 张 逸 邹俊生

编 者 谢卫军 胡 华 杨锋涛 张 逸 刘坚强

余剑敏 周利玲 徐高平 常章用 曾 玮

前言

PREFACE

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式和相互作用的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

以物理学基础为内容的大学物理课程,是高等学校理、工、农、医学类各专业学生一门重要的通识性必修基础课。该课程所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的知识。

本书是依据编者多年的教学实践,在原编教材的基础上,根据教育部颁布的《非物理类理工科类大学物理课程教学基本要求》,借鉴国内外优秀大学物理教材编写而成的。在编写过程中,力求内容尽量全面地涵盖大学生应掌握和了解的大学物理学知识,保证基本要求中 A 类知识点的宽度和深度, B 类知识点弱化处理,表述做到简明扼要;突出物理思想、物理图像,行文思路清晰,降低数学要求(避免复杂数学推导和运算)。根据目前高校课程改革和压缩课时的形势,编写中尽量将可写可不写的内容去掉,压缩整套书的篇幅,以达到内容精简的目的。

全书分上、下册出版,上册包括第 1 篇力学,第 2 篇电磁学;下册包括第 3 篇热学,第 4 篇机械振动和机械波,第 5 篇光学,第 6 篇近代物理学。书中除每章之后的阅读材料供学生选读外,凡冠有*的章节可供教师根据课时数和专业的需要选用。

本书由魏建宁、谢卫军任主编,胡华、杨锋涛、张逸、邹俊生任副主编。此外,参加本书编写的人员还有:刘坚强、余剑敏、周利玲、徐高平、常章用和曾玮。

在本书编写的过程中,得到了作者单位领导们的大力支持。同时,编者还参阅和引用了国内外许多同类教材的有关资料,受益匪浅,在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者们识浅才庸,力不从心,加上编写时间较仓促,书中难免存在错漏和不当之处,衷心希望广大读者提出宝贵意见。

编者

2014 年 4 月

目录

CONTENTS

第3篇 热学

第11章 热力学基础.....2

11.1 热力学基本概念.....2

11.1.1 热力学平衡态和态参量.....2

11.1.2 热力学第零定律.....3

11.1.3 理想气体物态方程.....3

11.2 热力学第一定律.....4

11.2.1 准静态过程.....4

11.2.2 内能.....4

11.2.3 功和热量.....4

11.2.4 热力学第一定律.....5

11.3 热力学第一定律的应用.....6

11.3.1 理想气体的等体过程.....6

11.3.2 理想气体的等压过程.....7

11.3.3 理想气体的等温过程.....8

11.3.4 理想气体的绝热过程.....9

*11.3.5 多方过程.....10

11.4 循环过程和卡诺循环.....12

11.4.1 循环过程.....12

11.4.2 热机和致冷机.....13

11.4.3 卡诺循环.....15

11.5 热力学第二定律.....17

11.5.1 热力学第二定律.....17

11.5.2 实际热力学过程的不可逆性.....18

11.5.3 卡诺定理.....19

11.6 熵和熵增加原理.....19

11.6.1 熵.....19

11.6.2 熵变的计算.....21

11.6.3 熵增加原理.....22

阅读材料 11 能源的开发利用.....23

习题.....23

第12章 气体动理论.....26

12.1 气体动理论基本观点与方法.....26

12.1.1 物质微观结构的假设.....26

12.1.2 统计规律与统计方法.....27

12.2 麦克斯韦速率分布律.....28

12.2.1 麦克斯韦速率分布律.....28

*12.2.2 玻耳兹曼分布律.....31

12.3 气体宏观性质的微观解释.....32

12.3.1 理想气体的微观模型.....32

12.3.2 理想气体压强的微观解释.....33

12.3.3 温度的微观实质.....34

*12.3.4 实际气体的范德瓦耳斯方程.....35

12.4 热运动能量的统计规律.....38

12.4.1 分子自由度.....38

12.4.2 能量按自由度均分定理.....38

12.4.3 理想气体的内能和热容.....39

*12.5 气体内输运现象及微观

机制	41
12.5.1 分子的平均自由程	41
*12.5.2 热传导现象的微观解释	43
*12.5.3 黏滞现象的微观解释	44
*12.5.4 扩散现象的微观解释	45
*12.5.5 3 种输运现象的比较	45
12.6 热力学第二定律和熵的统计意义	46
12.6.1 宏观态与微观态	46
12.6.2 热力学第二定律和熵的统计意义	46
12.6.3 熵的微观实质	47
阅读材料 12 低温现象	48
习题	49

第 4 篇 机械振动和机械波

第 13 章 机械振动	52
13.1 简谐振动	52
13.1.1 简谐运动的特征及运动方程	52
13.1.2 简谐运动的基本物理量	54
13.2 简谐运动的旋转矢量法	56
13.2.1 旋转矢量法	56
13.2.2 旋转矢量法的应用	58
13.3 振动的能量	59
13.4 简谐运动的合成	61
13.4.1 同方向、同频率简谐运动的合成	62
13.4.2 两个同方向不同频率简谐运动的合成	64
阅读材料 13 共振的应用及其危害	66
习题	68

第 14 章 机械波	70
14.1 机械波的产生和传播	70
14.1.1 机械波的形成和分类	71
14.1.2 波的几何表示法	71
14.1.3 波的特征物理量	72
14.2 平面简谐波	74
14.2.1 平面简谐波的波函数	74
14.2.2 波函数的物理意义	75
14.3 波的能量	76
14.3.1 波的能量	76
14.3.2 能流密度	78
14.4 惠更斯原理 波的衍射、反射和折射	78
14.4.1 惠更斯原理	78
14.4.2 波的衍射	80
14.4.3 波的反射和折射	80
14.5 波的叠加原理 波的干涉驻波	81
14.5.1 波的叠加原理	81
14.5.2 波的干涉	82
14.5.3 驻波	84
14.6 多普勒效应	87
14.6.1 多普勒效应	87
14.6.2 多普勒效应的演示实验	87
14.6.3 声波多普勒效应的理论分析	88
14.6.4 波的多普勒效应的科学应用	90
阅读材料 14 超声波	90
习题	92

第 5 篇 波动光学

第 15 章 光的干涉	98
15.1 相干光	98

15.1.1	普通光源的特性	98
15.1.2	相干光	99
15.1.3	普通光源获得相干光的方法	100
15.2	分波阵面干涉	100
15.2.1	杨氏双缝干涉	100
15.2.2	菲涅尔双面镜干涉	102
15.2.3	劳埃德镜干涉	103
15.3	光程和光程差析	103
15.3.1	光程	103
15.3.2	光程差	104
15.3.3	薄透镜的等光程性	105
15.4	分振幅干涉	105
15.4.1	薄膜干涉	105
15.4.2	等倾干涉	108
15.4.3	等厚干涉	109
15.5	迈克耳孙干涉仪	112
15.5.1	迈克耳孙干涉仪的结构及原理	112
15.5.2	干涉图样的讨论	113
	阅读材料 15 激光干涉仪	114
	习题	115

第 16 章 光的衍射 118

16.1	光的衍射现象与惠更斯—菲涅耳原理	118
16.1.1	光的衍射现象	118
16.1.2	惠更斯—菲涅耳原理	119
16.1.3	菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	120
16.2	夫琅禾费单缝衍射	121
16.2.1	夫琅禾费单缝衍射实验装置	121
16.2.2	菲涅耳半波带法	121
16.2.3	夫琅禾费单缝衍射图样分析	122
16.3	夫琅禾费圆孔衍射	124

16.3.1	夫琅禾费圆孔衍射	124
16.3.2	光学仪器分辨率	125
16.4	光栅衍射	126
16.4.1	衍射光栅	126
16.4.2	光栅衍射条纹	127
16.4.3	光栅光谱	129
16.5	X 射线的晶体衍射	131
16.5.1	X 射线	131
16.5.2	劳厄实验	131
16.5.3	布拉格方程	132
	阅读材料 16 全息照相	133
	习题	136

第 17 章 光的偏振 138

17.1	光的偏振性 马吕斯定律	138
17.1.1	自然光与偏振光	138
17.1.2	偏振片及起偏与检偏	140
17.1.3	马吕斯定律	140
17.2	布儒斯特定律	141
17.2.1	反射光与折射光的偏振	141
17.2.2	布儒斯特定律	142
17.3	光的双折射	143
17.3.1	双折射现象	143
17.3.2	双折射晶体的光轴与主截面	143
17.3.3	双折射现象的解释	144
17.3.4	尼科耳棱镜	145
17.3.5	椭圆偏振光和圆偏振光	146
17.3.6	四分之一波片和二分之一波片	147
17.4	旋光现象	147
17.4.1	旋光现象	147
17.4.2	旋光现象的应用	148
	阅读材料 17 立体视觉与立体电影	148
	习题	150

第 6 篇 近代物理学

第 18 章 狭义相对论基础 155

18.1 牛顿的时空观 155

18.1.1 牛顿力学的时空观 155

18.1.2 爱因斯坦的两个基本假设 157

18.2 洛伦兹速度变换公式 158

18.2.1 洛伦兹变换 158

18.2.2 速度的变换 159

18.3 爱因斯坦的时空观 160

18.3.1 同时性的相对性 160

18.3.2 长度收缩 162

18.3.3 时间延缓 162

18.4 相对论动力学 165

18.4.1 质量与速率的关系 165

18.4.2 相对论动力学方程 166

18.5 相对论能量 166

18.5.1 相对论动能 167

18.5.2 质量和能量的关系 168

18.5.3 能量和动量的关系 169

阅读材料 18 广义相对论简介 170

习题 172

第 19 章 量子物理基础 174

19.1 黑体辐射和普朗克量子假说 174

19.1.1 基尔霍夫定律 174

19.1.2 黑体和黑体辐射 175

19.1.3 黑体辐射的实验定律 176

19.1.4 普朗克量子假说 177

19.2 光的量子性 178

19.2.1 光电效应及其实验规律 178

19.2.2 经典物理的困难 180

19.2.3 爱因斯坦光子假说 180

19.2.4 光电效应的应用 183

19.3 康普顿效应 183

19.3.1 康普顿效应 183

19.3.2 光的波粒二象性 185

19.4 玻尔的氢原子理论 186

19.4.1 氢原子光谱的规律 186

19.4.2 原子的核式结构 186

19.4.3 玻尔理论的基本假设 187

19.4.4 玻尔理论的基本结论 188

19.5 实物粒子的波粒二象性 190

19.5.1 德布罗意假设 190

19.5.2 不确定关系 193

19.5.3 波函数及其概率解释 196

19.6 薛定谔方程 198

19.6.1 薛定谔方程的建立 198

19.6.2 定态薛定谔方程 200

19.6.3 力学量用算符表示 202

19.6.4 薛定谔方程的简单应用 203

19.7 氢原子量子理论 209

19.7.1 角动量算符的本征值问题 210

19.7.2 氢原子的能量和电子几率密度 211

19.8 电子的自旋 泡利不相容原理 212

19.8.1 施特恩—盖拉赫实验 212

19.8.2 电子的自旋 214

19.8.3 原子中电子的壳层结构 215

阅读材料 19 纳米物理与纳米技术 218

习题 219

本书习题答案 221

参考文献 226

第 3 篇

热 学

热学是研究物质的热运动规律以及与热运动有关的性质的一门学科，它是物理学的重要组成部分。

热现象是自然界中最普遍的现象之一。人们通过对热现象的研究，逐步认识到，宏观物质是由大量分子、原子或离子组成的，这些微观粒子处于永不停息的无规则运动之中。我们把大量微观粒子的无规则运动称为热运动。正是由于大量微观粒子的热运动才导致了物质的宏观热现象。可以说，热运动是热现象的微观本质，热现象是热运动的宏观表现。热运动虽然包含着机械运动，却不能简单地归结为机械运动，它是一种比机械运动更复杂、更高级的运动形式。研究热现象，一方面要以力学的概念和规律为基础，另一方面还需引入新的概念，探索新的规律。

在热学中，常把作为研究对象的物体或物体系统称为热力学系统，简称系统。把处于系统之外的物体或物体系统称为外界。根据系统与外界相互作用情况，系统可分为开放系统、封闭系统和孤立系统。与外界既有物质交换又有能量交换的系统称为开放系统。与外界只有能量交换没有物质交换的系统称为封闭系统。与外界既无物质交换又无能量交换的系统称为孤立系统。

人们在热学研究中，采用宏观和微观两种方法研究问题，于是便形成了宏观和微观两套理论。热力学是热学的宏观理论，它是依据观察的实验事实，总结出热现象的规律。统计物理学则是热学的微观理论，它是依据每一个微观粒子所遵循的力学规律，利用统计原理推出热现象的规律。两者从不同的侧面研究热现象，具有不同的特点。热力学是大量事实的总结，结论具有高度可靠性和普遍性，可以用以验证统计物理学结论的正确性。而统计物理学则深入具体物质的微观结构，能够揭示热现象的本质和物质特性。两者起着相辅相成的作用。

热学发展至今已产生许多分支学科，如非平衡态热力学、量子统计学、工程热力学、传热学等，它们的理论和方法在气象学、低温物理、固体物理、表面物理、等离子体、物质结构、空间科学等尖端科学的研究中得到广泛应用。

热力学基础

热力学是从大量事实中总结出热现象的宏观基本规律，并以此为依据研究宏观物质系统的平衡态性质。本章学习热力学理论的基础知识，主要内容有：平衡态、准静态过程、功、热量、内能和熵等基本概念，热力学第一定律、热力学第二定律和熵增加原理等基本规律及其应用。

11.1

热力学基本概念

11.1.1 热力学平衡态和态参量

经验表明，一个孤立的热力学系统，经一段较长时间后，系统的各种宏观性质不再随时间变化。在不受外界影响的条件下，系统各种宏观性质不随时间变化的状态称为热力学平衡态，简称平衡态。平衡态是一种理想的概念，因为不受外界影响的系统是不存在的，所以严格的平衡态不可能存在。然而，当外界对系统的影响很小，以至于可以忽略时，系统的状态就可以近似看成平衡态。

系统处在平衡态时，其各种宏观性质不再随时间变化，因而可以用一组宏观物理量的值来表征这些性质。事实上，这组宏观物理量之间存在一定的联系，各物理量的变化并不完全独立。我们把其中相互独立的变量叫做态参量。用态参量就可完全确定系统的状态。例如，一定量的气体经一段较长时间后，气体的压强 p 、体积 V 、温度 T 具有确定值，且不随时间变化，我们就说该气体处于平衡态。由于压强 p 、体积 V 、温度 T 三个变量中只有两个独立，因此只要用任意两个态参量就可描述气体的平衡态。

在以 p 为纵轴， V 为横轴的 p - V 图上的一点，代表气体的一个平衡态，如图11-1中的点 $A(p_1, V_1)$ 或点 $B(p_2, V_2)$ 。

在国际单位制中，压强的单位为帕斯卡(Pa)，体积单位为立方米(m^3)。

本章所讨论的状态，除特别声明外，均指平衡态。

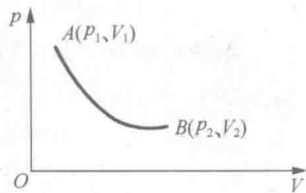


图 11-1 p - V 状态图

11.1.2 热力学第零定律

日常生活中,人们用温度来描述物体的冷热程度。物体热就说温度高,物体冷就说温度低。这种概念依赖于人的主观感觉。温度的科学定义建立在热力学第零定律的基础之上。

实验证明,两个冷热程度不同的物体相互接触,会通过传热交换能量。当两物体的冷热程度相同后,传热就会停止,此时我们说这两个物体处于热平衡。如果两物体 A、B 分别与物体 C 处于热平衡,那么物体 A 和 B 也处于热平衡。这一结论称为热力学第零定律。为了描述处于热平衡的共同性质,引入温度的概念。由热力学第零定律可知,一切互为热平衡的物体都具有相同的温度。

实验又证明,几个互为热平衡的物体分开后,它们将保持这个状态不变。这表明每个系统的温度由系统本身的状态决定。事实上,温度是系统内大量分子热运动的剧烈程度的宏观表现。

热力学第零定律不仅给出温度的科学概念,而且提出了温度的测量方法。例如选一物体作为温度计,当被测物体与温度计处于热平衡,温度计的温度就是被测物体的温度。

温度的数值表示法称温标。常用温标有:摄氏温标 t 和热力学温标 T 。二者换算关系如下:

$$T = 273.15 + t$$

国际上规定热力学温标为标准温标,单位为开(K)。摄氏温标单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

11.1.3 理想气体物态方程

一定量气体处在平衡态时,温度 T 与态参量(压强 p 和体积 V) 之间的函数关系称气体的物态方程。一般形式为

$$T = f(p, V) \quad (11-1a)$$

至于气体的物态方程的具体形式,则需要由实验来确定。

实验表明,在压强不太大(与大气压相比)和温度不太低(与室温相比)的条件下,各种气体的性质都趋于一致,近似遵守气体三定律。我们把严格遵守气体三定律的气体抽象成一种理想化模型——理想气体。如不特别指明,本章所讨论的气体均指理想气体。

由气体三定律和阿伏伽德罗定律可以推出理想气体物态方程:

$$pV = \nu RT \quad (11-1b)$$

式中: ν 为气体的摩尔数; $R=8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 称为气体普适常数。式(11-1b)给出了理想气体处于平衡态时,温度与各状态量之间的关系。实验表明,在高温和低压条件下,各种气体的行为都接近理想气体物态方程所反映的规律。

例 11-1 一容器盛有 0.1kg 的某种气体,其压强不太大,温度为 47°C 。因为容器漏气,经若干时间后,压强降为原来的 $5/8$,温度降为 27°C 。问漏掉多少气体?

解: 设初态 (p 、 V 、 T 、 m), 末态 (p' 、 V 、 T' 、 m')。

根据理想气体物态方程有以下方程:

$$\text{初态、} pV = \frac{m}{M} RT$$

$$\text{末态 } p'V = \frac{m'}{M} RT'$$

联立两式,消去 V 得

$$m' = m \frac{T}{T'} \frac{p'}{p} = 0.1 \times \frac{(273+47)}{273+27} \times \frac{5}{8} \text{ kg} = 0.067 \text{ kg}$$

$$\Delta m = m - m' = (0.1 - 0.067) \text{ kg} = 0.033 \text{ kg}$$

答：漏掉 0.033kg 气体。

11.2

热力学第一定律

11.2.1 准静态过程

当系统与外界发生相互作用时，系统的状态将随时间变化而变化，我们就说系统经历了一个热力学过程，简称过程。在实际过程中，由于系统的状态发生变化，所以过程中经历的每一个中间状态都不可能是平衡态，而是非平衡态，这样的过程称为非静态过程。但如果过程中所有中间状态都无限趋近于平衡态，那么系统经历的过程就称为准静态过程。

处于平衡态的系统受外界作用，平衡态随即被破坏。系统从非平衡态达到新的平衡态需要一定的时间，这个时间称为弛豫时间。如果外界作用很小，过程进行的时间比弛豫时间长，可把过程视为准静态过程。如图 11-2 所示，在带有活塞的容器内储有一定量的气体，活塞可沿容器壁滑动，在活塞上放置一些砂粒，开始时，气体处于平衡态 (p_1 、 V_1 、 T_1)，随后将砂粒一颗一颗缓慢地拿走，气体的状态最后变为 (p_2 、 V_2 、 T_2)。由于变化过程中，气体的状态变化非常缓慢，容器中气体的状态始终趋近于平稳态，因而可视为准静态过程。实际过程不可能无限缓慢，所以准静态过程只是一种理想过程，但它在热力学的理论研究和对实际应用的指导上有着重要的意义。

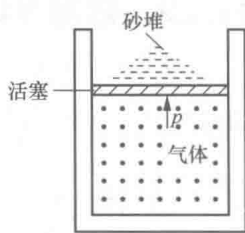


图 11-2 准静态过程

由于气体在准静态过程中的任何状态都是平衡态，有确定的态参量，所以其过程可以用 p - V 图上的一条确定的曲线来表示，如图 11-1 中点 A 和点 B 之间的连线。这条曲线称为过程曲线。

在本章中，如不特别指明，所讨论的过程均指准静态过程。

11.2.2 内能

力学中，系统的机械能是指与机械运动有关的能量。热学中，系统的内能是指系统内部与分子热运动有关的能量（热能），它包括分子热运动动能与分子间相互作用势能。内能用符号 U 表示，在国际单位制中，其单位为焦耳 (J)。

内能是系统状态的单值函数，由系统的状态决定。反之，内能并不能完全决定系统的状态。焦耳实验表明，理想气体的内能仅是温度的单值函数，与体积无关。

“热能”在使用中，有时指内能，有时指热量。

11.2.3 功和热量

实验表明，做功和传热是外界和系统间相互作用的两种基本方式。通过做功和传热，系统与

外界之间传递能量,从而使系统的内能发生变化。功和热量都是系统内能变化的量度。

1. 功

功的含义十分广泛,除力学中机械功外,还有其他形式的功。系统由于体积变化所作的功叫做体积功。用符号 A 表示,功的单位与能量单位相同。

我们来讨论体积功。如图 11-3 (a) 所示,以气缸内压强为 p 的气体为系统,活塞的面积为 S 。当气体膨胀推动活塞移动距离 $d l$ 时,气体对活塞所做的元功为

$$dA = pSdl = p dV \quad (11-2a)$$

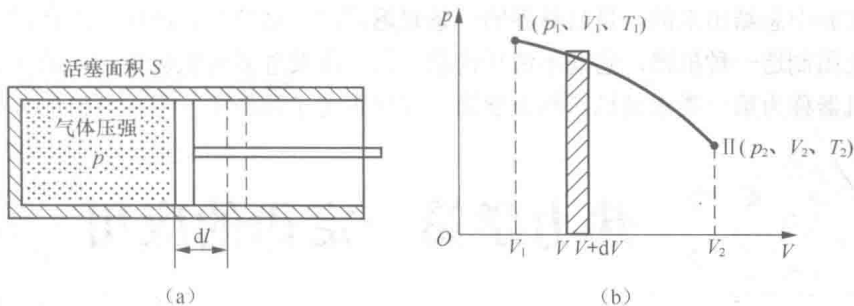


图 11-3 准静态过程的体积功

式中,压强 p 和体积 V 是描述气体平衡态的态参量。元功 dA 可用图 11-3(b)中的矩形小面积表示,因此气体由状态 I 变化到状态 II 的准静态过程中,气体所做的总功为

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (11-2b)$$

如果知道系统压强随体积变化的函数关系,利用式 (11-2b) 就可计算系统所做的体积功。对于体积功的理解,应该注意以下几点。

(1) 功值等于做功过程传递的能量,能量形式一般发生变化(热能与其他形式能量之间的转化)。

(2) 功是标量,有正负。若 $dV > 0$, 则 $dA > 0$, 系统对外界做功。若 $dV < 0$, 则 $dA < 0$, 外界对系统做功。若 $dV = 0$, 则 $dA = 0$, 系统不做功。

(3) 由图 11-3 (b) 可知,系统经历的过程不同,过程曲线下面所围的面积不同,系统所做的功也就不同。也就是说,功值不仅与系统的始末状态有关,还与路径有关。因此功是一个过程量。

2. 热量

系统与外界之间或系统内各部分之间由于存在温度差而传递的能量(热能)叫做热量,用符号 Q 表示,其单位与内能单位相同。

应当指出,热量传递的多少与传递的过程有关。所以,热量与功一样也是过程量。

11.2.4 热力学第一定律

一般情况下,在系统状态变化的过程中,外界对系统做功和传热往往同时存在,两者都能使系统的内能发生变化。一个系统从平衡态 I 经历一个热力学过程变化到平衡态 II。在此过程中,从外界吸收热量 Q , 对外界做功 A , 系统的内能由 E_1 变为 E_2 , 内能的增量为 $\Delta E = E_2 - E_1$ 。大量事实表明:

$$Q = \Delta E + A \quad (11-3a)$$

式 (11-3a) 称为热力学第一定律。它指出, 系统从外界吸收的热量, 一部分用来增加系统的内能, 另一部分用来对外界做功。

式 (11-3a) 中各量的符号规定: 系统从外界吸热 $Q > 0$, 系统向外放热 $Q < 0$; 系统内能增加 $\Delta E > 0$, 系统内能减少 $\Delta E < 0$; 系统对外做功 $A > 0$, 外界对系统做功 $A < 0$ 。

对无限小过程且只有体积功时, 热力学第一定律可写成

$$dQ = dE + pdV \quad (11-3b)$$

式 (11-3a) 和式 (11-3b) 是能量守恒定律在热力学过程中的表现形式。它是人们在长期的生产实践和科学实验中总结出来的, 是自然界的一条普遍规律, 对气体、液体、固体都适用。历史上曾有不少人企图制造一种机器, 它既不消耗内能, 又不需要外界提供能量, 而能源源不断地对外做功, 这种机器称为第一类永动机。热力学第一定律否定了制造第一类永动机的可能性。

11.3

热力学第一定律的应用

11.3.1 理想气体的等体过程

1. 理想气体等体过程的特点

系统体积保持不变的过程称为等体过程。等体过程可用平行于 p 轴的一条直线表示, 称为等体线, 如图 11-4 所示。

理想气体在等体过程中, 由于 $V = \text{恒量}$, 由理想气体物态方程可得等体过程方程

$$\frac{p}{T} = \text{恒量} \quad (11-4)$$

在无限小等体过程, 理想气体对外不做功, $dA = 0$, 由热力学第一定律知

$$dQ = dE \quad (11-5a)$$

对有限等体过程, 式 (11-5a) 可表示为

$$Q = \Delta E \quad (11-5b)$$

式 (11-5a) 和式 (11-5b) 表明, 在等体过程中, 理想气体系统吸收的热量全部用于增加系统的内能。

2. 定体摩尔热容

为了探讨理想气体在等体过程中所吸收的热量, 引入定体摩尔热容。设 1mol 理想气体在等体过程中所吸收的热量为 dQ , 温度上升 dT , 理想气体的定体摩尔热容定义为

$$C_{V,m} = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V \quad (11-6)$$

实验表明, 理想气体在温度变化不太大的过程中, $C_{V,m}$ 近似为常数。国际单位制中, 定体摩尔热容的单位为 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

由式 (11-6) 可得无限小等体过程中, 1mol 理想气体所吸收的热量为

$$dQ = C_{V,m} dT \quad (11-7a)$$

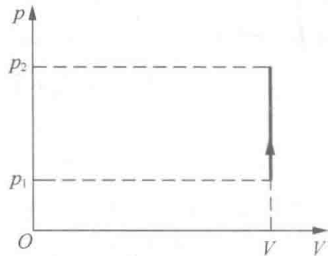


图 11-4 等体过程曲线

对于 ν mol 的理想气体, 当温度由 T_1 变为 T_2 时, 如果温差不太大, 对式 (11-7a) 积分, 可得理想气体吸收的热量为

$$Q = \nu C_{V,m}(T_2 - T_1) \quad (11-7b)$$

根据式 (11-5b) 和式 (11-7b), 理想气体内能的增量为

$$\Delta E = \nu C_{V,m}(T_2 - T_1) \quad (11-8)$$

式 (11-8) 虽然是从理想气体等体过程得出, 但它适用于理想气体的任何过程。这是因为理想气体的内能仅是温度的函数, 其内能的增量由始末两态的温度差决定, 与系统变化的过程无关。

11.3.2 理想气体的等压过程

1. 理想气体的等压过程的特点

系统压强保持不变的过程称等压过程。等压过程在 p - V 图上可用等压线表示, 如图 11-5 所示。

理想气体在等压过程中, 由于 $p = \text{恒量}$, 由理想气体物态方程可知等压过程方程为

$$\frac{T}{V} = \text{恒量} \quad (11-9)$$

设无限小等压过程中, 理想气体吸收热量为 dQ , 系统对外做的功为 pdV , 由热力学第一定律知

$$dQ = dE + pdV \quad (11-10)$$

若理想气体在等压过程中, 吸收热量为 Q , 它的体积由 V_1 变为 V_2 , 则系统对外做的功为

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV = p(V_2 - V_1) \quad (11-11)$$

式 (11-10) 可表示为

$$Q = \Delta E + p(V_2 - V_1) \quad (11-12)$$

式 (11-10) 和式 (11-12) 表明, 在等压过程中, 理想气体系统吸收的热量, 一部分用来增加系统的内能, 另一部分用来对外做功。

2. 定压摩尔热容

为了研究理想气体在等压过程中吸收的热量, 引入定压摩尔热容。设 1mol 理想气体在等压过程中所吸收的热量为 dQ , 温度升高 dT , 定义理想气体的定压摩尔热容为

$$C_{p,m} = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (11-13)$$

实验表明, 理想气体的温度变化不太大时, $C_{p,m}$ 也近似为常数。其单位与定体摩尔热容相同。

由式 (11-13) 可知, 无限小等压过程中, 1mol 理想气体吸收的热量为

$$dQ = C_{p,m} dT \quad (11-14a)$$

对于 ν mol 理想气体, 实验表明, 在等压过程中, 设理想气体的温度由 T_1 变为 T_2 , 若温度变化不太大, 由式 (11-14a) 积分, 可得理想气体吸收的热量为

$$Q = \nu C_{p,m}(T_2 - T_1) \quad (11-14b)$$

3. 迈尔公式

下面进一步研究理想气体的定压摩尔热容 $C_{p,m}$ 与定体摩尔热容 $C_{V,m}$ 之间的关系。对无限小

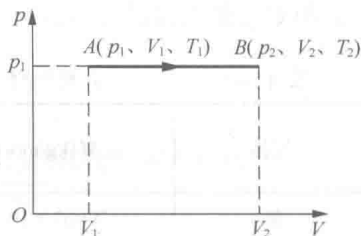


图 11-5 等压过程曲线

等压过程应用热力学第一定律，有

$$dQ = C_{V,m}dT + pdV \tag{11-15a}$$

将理想气体物态方程两边微分得

$$pdV = RdT$$

代入式 (11-15a) 得

$$dQ = C_{V,m}dT + RdT \tag{11-15b}$$

将式 (11-14a) 代入式 (11-15b) 得

$$C_{p,m} = C_{V,m} + R \tag{11-16}$$

式 (11-16) 称为迈尔公式。

在实际应用中，常常用到 $C_{p,m}$ 与 $C_{V,m}$ 的比值，称为摩尔热容比，用符号 γ 表示，即

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} \tag{11-17}$$

$C_{p,m}$ 和 $C_{V,m}$ 通常通过实验测定。表 11-1 给出几种气体摩尔热容的实验值。

表 11-1 几种气体摩尔热容的实验值 (在 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 25°C 时)

气体	$M/(\text{kg/mol})$	$C_{p,m}/[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$	$C_{V,m}/[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$	$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}}$
氢	4.003×10^{-3}	20.79	12.52	1.66
氦	20.18×10^{-3}	20.79	12.68	1.64
氩	39.95×10^{-3}	20.79	12.45	1.67
氢	2.016×10^{-3}	28.82	20.44	1.41
氮	28.01×10^{-3}	29.12	20.80	1.40
氧	32.00×10^{-3}	29.37	20.98	1.40
空气	28.97×10^{-3}	29.01	20.68	1.40
一氧化碳	28.01×10^{-3}	29.04	20.74	1.40
二氧化碳	44.01×10^{-3}	36.62	28.17	1.30
一氧化氮	40.01×10^{-3}	36.90	28.39	1.31
硫化氢	34.08×10^{-3}	36.12	27.36	1.32
水蒸气	18.02×10^{-3}	36.21	27.82	1.30

11.3.3 理想气体的等温过程

系统温度保持不变的过程称为等温过程。例如，一气缸内储有温度为 T 的一定量理想气体，气缸壁由绝热材料制成，气缸的底部为热的良导体。将气缸底部与温度为 T 的恒温热源（热源的温度可视为不变）相接触，如图 11-6（a）所示。气体从热源吸热而体积膨胀，温度始终与热源温度相同。

理想气体在等温过程中， T =恒量，由理想气体物态方程可得等温过程方程

$$pV = \text{恒量} \tag{11-18}$$

等温过程可用 p - V 图上的一条曲线表示，如图 11-6（b）所示。